

Aplicação dos conceitos de cadeia de tolerâncias em manufatura de bombas de compressores herméticos

GOUVEA, Barbara*; BRUNO, Danver Messias

Departamento de Ciências da Administração e Tecnologia, Engenharia de Produção, Universidade de Araraquara – UNIARA;

* Autor de correspondência. E-mail: barbaragouvealm@gmail.com

RESUMO

As competitividades das indústrias estão relacionadas em um círculo envolvendo qualidade, custos e produção. Melhorias na qualidade visam melhorias no projeto mecânico, os quais por sua vez, devem ser fabricados com mínimo custo. As cadeias de tolerâncias são aplicadas em projetos mecânicos e levam em consideração curvas de distribuição de probabilidades para dimensionar a melhor forma de conduzir a fabricação de cada item envolvido nestas cadeias. Os métodos “worst case” e o “método estatístico” são os mais utilizados para fabricação de componentes em larga escala e visam a redução dos custos de fabricação. É com este intuito que este trabalho tem seu objetivo, o qual, apresentar uma sistemática para dimensionar uma cadeia de dimensão na fabricação de bombas de compressores herméticos em larga escala.

Palavras-chave: Projeto de Produto, Tolerância, Cadeia de Tolerância.

Application of the tolerance chain components in the manufacture of hermetic compressor pumps

ABSTRACT

The competitiveness of industries is related in a circle involving quality, costs and production. Improvements in quality are aimed at improvements in mechanical design, which in turn must be manufactured at minimal cost. Chain of tolerances are applied in mechanical designs and consider probability distribution curves to size the best way to conduct the fabrication of each item involved in these chains. The "worst case" and "statistical method" methods are the most widely used for manufacturing large-scale components and aim at reducing manufacturing costs. It is with this intention that this work has its objective, which, to present a systematics to dimension a chain of dimension in the manufacture of hermetic compressors pumps in large scale.

Keywords: Product Design, Tolerance, Tolerance Chain.

1 Introdução

O projeto de um produto está diretamente relacionado aos projetos mecânicos e a manufatura.

Os projetos mecânicos são desenvolvidos em áreas específicas de uma indústria, e, são inicialmente atribuídos a eles dimensões com tolerâncias especificadas segundo os cálculos de resistência dos materiais de acordo com a funcionalidade do produto.

Já a manufatura (parque industrial) possui máquinas que foram concebidas segundo os conceitos prévios de capacidade de processos (CP, CPk), isto é, possuem suas tolerâncias de fabricação bem definidas. Processos de manufatura são inerentemente imprecisos devido às diversas características do sistema que os influenciam, como: tipo de processo de fabricação, temperatura do ambiente, propriedades do material usinado, ferramentas, lubrificantes, folgas entre elementos de máquinas, métodos de medição.

Para definir as tolerâncias nos produtos torna-se necessário um estudo dependente da manufatura e projeto, isto porque as produções de peças devem possuir um baixo custo para que se tenha competitividade no mercado.

Os métodos de avaliação utilizados geralmente são os métodos “*worst case*” (método absoluto) e “métodos probabilísticos”.

A justificativa de elaborar este trabalho é devido à importância do relacionamento das etapas de projeto e fabricação na interação entre tolerâncias.

Estas influências se conjugam causando uma variação dimensional sobre a peça fabricada onde por consequência, os projetos mecânicos são dimensionados prescrevendo sobre as dimensões uma variação permissível chamada tolerância dimensional.

É objetivo deste trabalho analisar os métodos dos modelos estatísticos e absolutos envolvidos na fabricação das peças de um compressor hermético e fazer um levantamento do comportamento dos processos de fabricação a fim de verificar as tendências estatísticas dos desvios de fabricação.

2 Desenvolvimento

As variações dimensionais (tolerâncias) projetadas e controladas sem responsabilidade pode causar problemas de custo durante a montagem dos conjuntos, com isso, Chase (1999) enfatiza a necessidade de extensivos retrabalhos, grandes lotes refugados, paradas de montagens, além de causar danos no desempenho do produto e insatisfação do cliente.

Os fatos relatados refletem a necessidade de definição e estudo inerente das relações que caracterizam as tolerâncias dimensionais durante a fabricação, projeto e montagem de dispositivos mecânicos. Pode-se afirmar que as tolerâncias são a primeira ferramenta de controle de um projeto, exercitada através da seleção do processo, controle do processo e procedimentos de inspeção. O conjunto descrito ajuda a encontrar uma boa tolerância de projeto a qual pode ser representada por limites absolutos numéricos ou também fazer uso de um modelo probabilístico, possibilitando fazer inferências estatísticas para sua definição.

É importante observar que especificar tolerâncias, definir tipos de tolerâncias e relatar valores de tolerâncias são conduzidos em instruções normativas.

Porém, as normas não ditam um método de como as tolerâncias deveriam ser especificadas. Até 1990, os elementos eram tolerados baseados em informações de manuais de elementos de máquinas, em anexos guardados ao longo da experiência do projetista, ou sistemas automáticos designavam tolerâncias baseados na função do dispositivo.

Ainda hoje não estão claras as ideias sobre esse assunto. A ASME Y14.5 e a ISO 1101 têm sido estabelecidas para assegurar uma comunicação apropriada de tolerâncias dimensionais e geométricas (GD&T), porém, observa-se que estas normas foram desenvolvidas através de informações coletadas ao longo de anos de prática de engenharia ao invés dos princípios matemáticos. De acordo com Shen (2004), isto leva a dois problemas:

- Falta de comunicação e má interpretação de especificações de projeto pelos projetistas, departamentos de qualidade, clientes e ainda a indisponibilidade da análise tridimensional completa de cadeias de tolerâncias envolvendo todos os tipos de variações dimensionais e geométricas;
- Propostas para substituir as normas completamente, inaceitável para a indústria que julga a perda do conhecimento empírico contido na norma atual.

Conforme Bjork (1978), fica evidente a importância da tolerância bem definida, e esse fato implica que nas montagens mecânicas algumas dimensões são mais importantes do que outras e que algumas dimensões devem ter menos responsabilidade do que outras, pois a tolerância final ou funcional do conjunto mecânico é afetada pela somatória das tolerâncias individuais do conjunto.

A literatura atribui dois campos distintos para esta análise. A primeira consiste na análise de tolerância na qual o projetista distribui tolerâncias aos componentes observando a condição funcional do mecanismo. A síntese de tolerância corresponde à determinação das tolerâncias críticas dos componentes que contribuem para a condição funcional do mecanismo. Laperrière *et al.* (1999) utilizaram cadeias de pontos coordenados em relação a dimensão

funcional e aplicaram o conceito de transformações homogêneas e para relacionar as duas fases de dimensionamento de tolerâncias.

No entanto, um conjunto de peças mecânicas contém muitas características que envolvem tolerâncias e estas características interagem umas com as outras e se acumulam. Isto significa dizer que componentes de peças quando montadas tem como resultado dimensional final a somatória das tolerâncias desses componentes. E para conseguir alta precisão de montagem final as peças necessitam ser produzidas com tolerâncias apertadas elevando o custo do produto.

A engenharia dispõe de ferramentas que trabalham para gerenciar e minimizar o impacto no custo do produto quando nas fases de projeto interagindo com o processo, avaliando a distribuição de tolerâncias em componentes individuais e numa cadeia de dimensões.

Análise de tolerância é uma função do projeto enquanto a síntese de tolerância é função da produção. Entretanto, para fabricação com eficiência e economia deve-se implementar ambos os estudos. Análise de tolerância é um termo global que inclui duas categorias: a primeira corresponde ao método usado para determinar as especificações das tolerâncias individuais das peças correspondentes ao projeto; a segunda é um processo de determinação da variação cumulativa possível entre duas ou mais peças ou geometrias que se unem em um “loop”. Para Fischer (1994) esta segunda parte da definição é uma técnica comumente chamada de *tolerance stackup*. Anselmetti *et al.* (1993), desenvolveram um modelo matemático que distribui tolerâncias na fase inicial do projeto. O modelo considera fatores relativos ao material da peça (distorção), à rugosidade superficial, ao ferramental disponível em catálogos, à fixação da peça e outros. Como resultado descreve uma peça modelo com dimensões e tolerâncias, nas quais os projetistas poderão se orientar na análise de tolerâncias minimizando custos de avaliação na análise e podendo integrar o modelo como um dos gabaritos do CAD.

Utilizaram para as condições de restrição o inter-relacionamento entre tolerâncias que foi o método *worst case*, as restrições entre processos, levaram em consideração a camada de material a ser removida, onde os aspectos de tempo de usinagem e rugosidade superficial foram definitivos para a análise.

Zou et al (2001) descreveram a análise de tolerância como uma avaliação da atribuição apropriada da tolerância que pode resultar em custos baixos de montagem e uma alta probabilidade de ajuste (*fitting*) reduzindo o número de rejeição ou a quantidade de retrabalho. Ele avalia esse processo como um método analítico poderoso, pois não apenas prevê o efeito da variação do processo de manufatura, desempenho de projeto e custo de produção. Permite

aos engenheiros de processo e projeto em levar vantagem de se poder relaxar apropriadamente os processos, sem sacrificar a qualidade.

Na sequência de desenvolvimento da condição funcional vêm os ajustes a serem desenvolvidos, distribuindo ao longo de uma cadeia de dimensões novas especificações de tolerâncias. Compete a fase de síntese de tolerância este processo.

Conforme Ciurana et al. (2004) este processo é laborioso e o projetista necessita de ferramentas para gerenciar e calcular, pois não pode conduzir o problema sem considerar todas as peças ou características geométricas envolvidas na montagem do conjunto. O auxílio do sistema CAD ajuda a resolver esta dificuldade, pois contém informações geométricas do conjunto mecânico que capacitam sua solução.

Os maiores problemas de especificação de tolerância encontrados pelos projetistas são do tipo síntese de tolerância, o qual consiste na distribuição das tolerâncias da condição funcional entre os componentes que formam a cadeia dimensional. A tolerância funcional pode ser distribuída igualmente entre as componentes individuais, porém cada componente de tolerância pode ser fabricado por processos distintos e consequentemente custos distintos.

Síntese de tolerância envolve um processo chamado alocação de tolerância (*tolerance allocation*), que analisa as tolerâncias entre todos as componentes dimensionais de uma cadeia de elementos que envolvem a montagem de um conjunto, garantindo a especificação do produto e sua funcionalidade. “*Tolerance Allocation*” também pode ser entendido como o estudo do comportamento do processo aplicado a determinação de tolerâncias para cada componente e sua associação em cadeia.

É importante definir o termo muito utilizado na prática do estudo das tolerâncias, “*tolerance stackup*”. O termo refere-se a uma técnica utilizada para calcular uma variação de uma única distância não tolerada em desenho quando do empilhamento de vários elementos mecânicos.

Síntese de tolerância pode ser categorizada em dois tipos:

- *Worst case*
- Métodos Estatísticos

Worst case é um método conservativo enquanto os métodos estatísticos levam em consideração a análise do comportamento da distribuição probabilística dos processos em casos reais.

2.1 Worst case

O conceito do *worst case* em cadeia de tolerâncias consiste em somar as tolerâncias das componentes individuais dos elementos que compõem uma cadeia garantindo através do seu modelo matemático a máxima tolerância de montagem dos componentes e com isso garantir intercambiabilidade total entre estes componentes. A Equação (1), expressa a somatória.

$$TWC = \sum Ti \quad (1)$$

Onde TWC é a tolerância funcional e Ti são as tolerâncias individuais de cada componente mecânico.

Observa-se que o método trabalha com os limites absolutos numéricos da tolerância pois Ti constitui a tolerância de cada peça envolvida em uma montagem. Caso TWC seja maior que a tolerância funcional, será necessário revisar e redistribuir tolerâncias entre as componentes, proporcionando consequentemente tolerâncias mais apertadas entre elas ou, uma seleção 100 % das componentes será necessária para garantir a tolerância funcional. Isto tudo constitui em uma das possibilidades de avaliação do problema.

Percebe-se que é um método caro, pois trabalha com tolerâncias geralmente apertadas podendo necessitar de processos com índices de capacidade alta.

2.2 Métodos estatísticos

A baixa probabilidade da combinação do pior caso (*worst case*) ocorrer é levado em consideração estatisticamente. Basicamente o método tradicional, *root sum of the square* (RSS) considera a combinação das variâncias das dimensões medidas de cada peça envolvida em uma montagem, estimando o número de defeitos que poderá ocorrer.

O modelo RSS assume que as dimensões produzidas seguem uma distribuição normal. Então, considera que é mais fácil produzir peças em torno da média estatística. Para tanto considera os limites probabilísticos de $\pm 3\sigma$ para a tolerância. O modelo de análise é dado pela Equação (2):

$$TRSS = \pm 3\sqrt{\sum \sigma_n^2} \quad (2)$$

Onde σ_n é a medida do desvio padrão da amostra de cada peça envolvida em uma montagem.

Quando a média da distribuição está fora do centro por alguma razão, isto pode causar diferentes avaliações quanto ao nível de rejeição das peças envolvidas na montagem.

A Motorola Corp. com base no programa “Seis Sigma” de qualidade desenvolveram um modelo que vem chamando a atenção das indústrias, implementando uma nova tendência.

Com o intuito de aumentar os níveis de qualidade exigidos na competição mundial da indústria eletrônica implementaram o conceito para os processos de fabricação. Eles também consideraram variações de média e *drift* no processo e introduziram essas modificações no modelo.

O modelo seis sigma desenvolvido pela Motorola para avaliação de tolerâncias, foi formulado levando em consideração um fator K , apresentado na Equação (3), que quantifica o deslocamento de média sofrido por cada distribuição individual dos componentes.

$$\sigma_{mont} = \sqrt{\sum \left(\frac{Ti}{3Cpi(1-K)} \right)^2} \quad (3)$$

Para Chase (1999), Cp é o índice de capacidade da dimensão medida e K é o fator que deve ser observado durante a fabricação podendo ser atribuído entre 0 e 1.

2.3 Cp – Capabilidade do processo

Segundo Montgomery (2004), as curvas normais também auxiliam na qualificação dos processos de fabricação. Neste estudo, a capacidade de processo de produzir peças dentro de uma especificação é denominada de estudos de capacidade.

O estudo da Capabilidade de processo pode determinar índices que depende o critério de avaliação. Esses critérios visam obter resultados determinando a variabilidade instantânea dos processos ou leva em consideração a variabilidade das máquinas ao longo do tempo.

Em princípio é costume estabelecer os limites para calcular a capacidade de processo. Geralmente adota-se uma dispersão de 6σ para os processos de manufatura, estes valores representam uma probabilidade de 99,73 % da medida da característica geométrica de estar dentro dos limites estabelecidos. Assim, a Equação (4) apresenta o índice de capacidade de processo, que é obtido pela razão entre os limites do projeto e a variabilidade do processo em seis sigmas.

$$Cp = \frac{LSE - LIE}{6\sigma} \quad (4)$$

LSE (Limite superior de especificação)

LIE (Limite inferior de especificação)

Considerando a Tolerância sendo $LSE - LIE$ tem-se a Equação (5):

$$Cp = \frac{T}{6\sigma} \quad (5)$$

Se a tolerância de processo é passível totalmente da fabricação estipulada pela tolerância de projeto, temos que o índice de capacidade de processo é unitário, aumentando ou diminuindo em função do valor de sigma.

$$T = 6\sigma \quad \text{então} \quad CP = 1$$

Variações de processo ao longo do tempo também são consideradas no modelo de cálculo de CP . É possível dessa forma prevenir-se quanto a essas variações considerando os limites de processo em oito sigmas aumentando a probabilidade de os dados estarem dentro da tolerância de projeto mesmo que haja variação ao longo do tempo ou que minimize a rejeição dos dados.

$$T = 8\sigma \quad \text{então} \quad Cp = 1,33$$

Este índice é o valor de referência para *try out* de máquinas e controle de processos em chão de fábrica.

$c_p \geq 1,33$ significam processos capazes, e inferiores a este valor, os processos não são capazes e que possuindo características fabricadas fora da medida especificada em projeto.

3 Metodologia

Uma rotina foi desenvolvida para integrar os conceitos já elucidados sobre o processo de acumulo de tolerâncias. Pelo desenvolvimento da rotina, exposto na Figura 1, as dimensões estimadas dos processos de fabricação e o estudo da interação das dimensões, os desvios de média foram considerados.

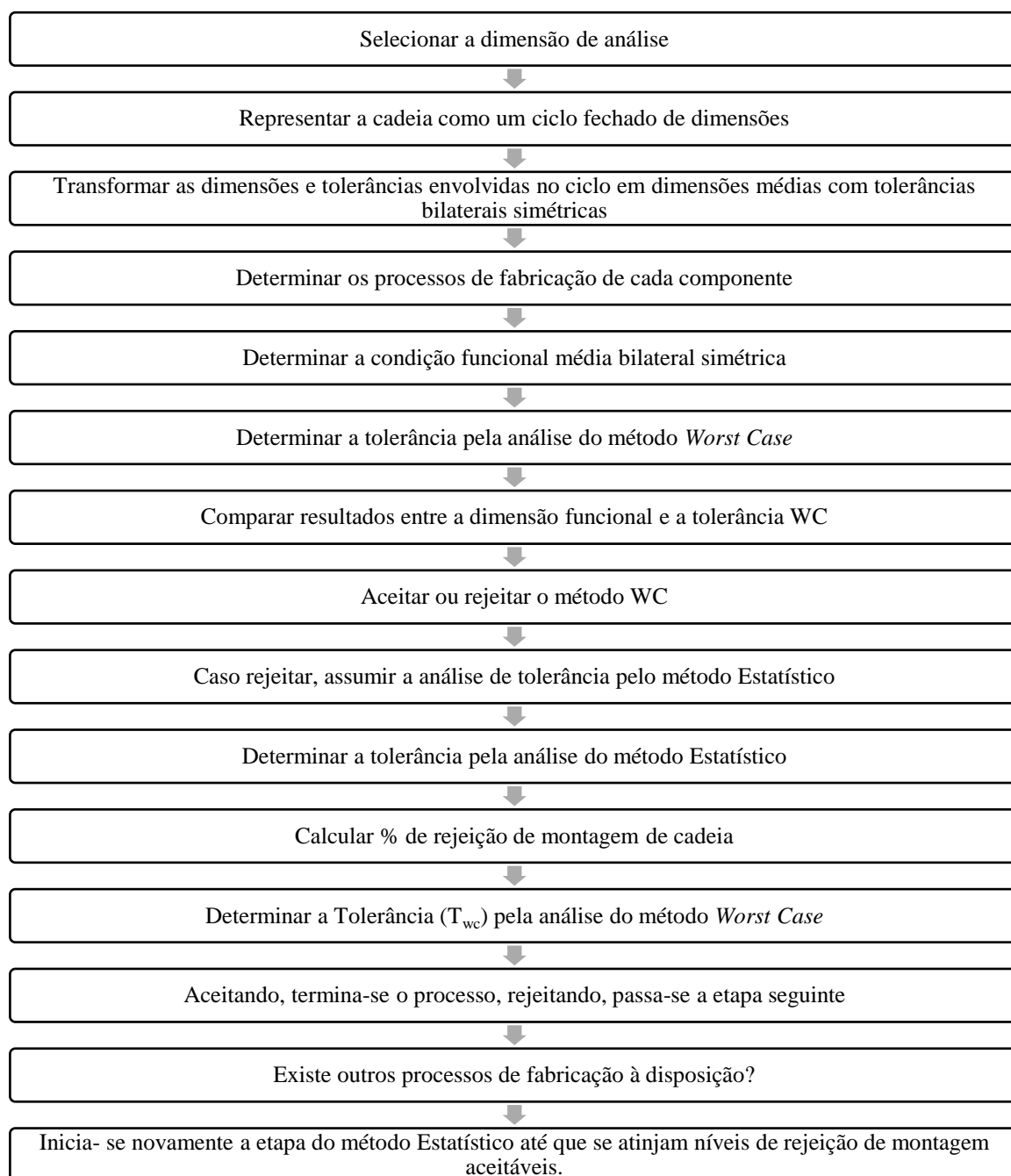
Este estudo é feito geralmente, considerando em muitos casos, o método absoluto, isto é, a soma das tolerâncias. O desenvolvimento da propagação das tolerâncias abordara a influência dos desvios de média inerentes dos processos de fabricação, os quais deverão ser medidos considerando a análise das características geométricas responsáveis pela determinação das dimensões da cadeia de tolerância, isto é, das peças que compõem o produto.

A análise da rotina, em conjunto com o levantamento dos custos de processo possibilitarão o engenheiro de produto a tomar decisões que permitirão uma melhor orientação visando consequentemente, a redução dos custos do produto

3.1 Metodologia para o desenvolvimento da avaliação de cadeias de dimensões: passos da cadeia

Cadeia de Tolerâncias também pode ser entendida como um conjunto de técnicas elaboradas sistematicamente para possibilitar tomadas de decisão envolvendo tópicos do projeto que sustentam sua viabilidade de fabricação quanto à qualidade, produtividade e custo. Fundamentalmente, todo processo de elaborar e avaliar a eficiência do modelo da equação funcional da cadeia está descrito na Figura 1.

Figura 1 – Metodologia para o desenvolvimento da avaliação da cadeia de tolerâncias



Fonte: Souza, V.A. 2013

3.2 Etapas de avaliação da síntese de tolerância

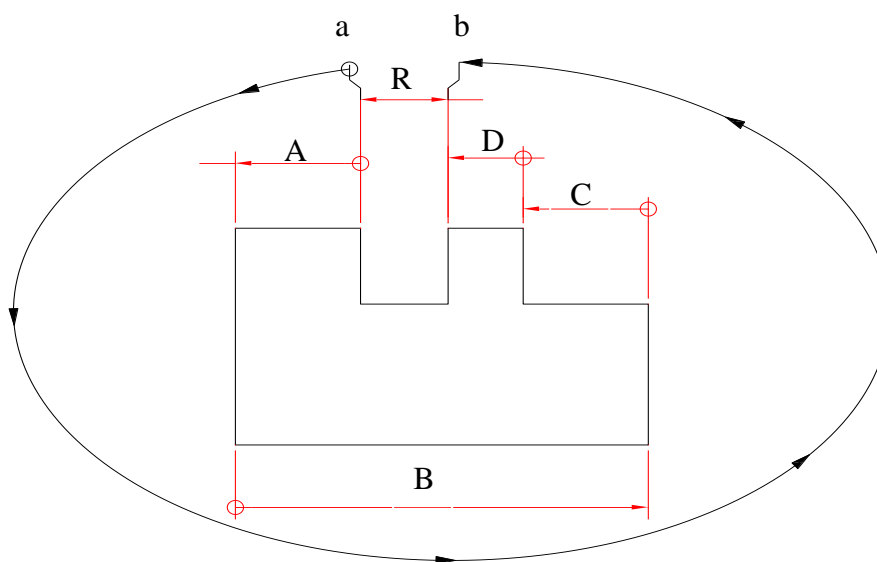
Para avaliação da síntese de tolerância, faz-se necessário determinar a condição funcional e, a partir desta desenvolver a equação da cadeia dimensional, as dimensões médias e as tolerâncias bilaterais. A seguir determina-se a contribuição das tolerâncias nos links dos vetores dimensão, especificamente a formação de links eixo-furo.

Condição funcional e desenvolvimento da equação de cadeia dimensional

A cadeia de dimensões pode ser aplicada em um conjunto de peças para avaliar a condição funcional entre as dimensões cotadas.

A condição funcional é uma relação representada por uma dimensão funcional e uma tolerância funcional e, determinada pela equação da cadeia dimensional modelada. Inicialmente, deve ser identificada qual a exigência do ajuste entre peças para o perfeito funcionamento do produto ou, ainda, quais as referências dimensionais máximas ou mínimas exigidas na cota de um desenho de uma peça. A escolha de qual critério adotar é baseada na análise do projetista. A Figura 2 mostra um exemplo de ciclo de cadeia dimensional. Condição funcional não é cotada, mas calculada como descrito a seguir.

Figura 2 – Ciclo da cadeia dimensional



Fonte: Souza, V.A. 2013

Visualizando a Figura 2 e identificando a exigência do ajuste “R”, a equação que representa a cadeia é definida pela representação das dimensões relativas à peça através de vetores dimensão, os quais, tendo sentido para a esquerda de “R” possuem sinal negativo e vetores dimensão com sentido para direita são positivos. A Equação (6) representa a cadeia dimensional.

$$R = -A + B - C - D \quad (6)$$

Após a identificação das peças que fazem parte da montagem para formar o ciclo fechado com referência à condição funcional, a dimensão de cada uma é tomada individualmente no projeto e as capacidades dos processos de fabricação são levantadas.

Apenas uma dimensão funcional deve ser incluída em uma cadeia, portanto, na análise de mecanismos compostos de diversas condições funcionais identificadas, diversas cadeias também deverão ser elaboradas.

Dimensões médias e tolerâncias bilaterais

Primeiramente, as dimensões toleradas em projeto são indicativas para determinar a máxima e mínima dimensão permitida para o funcionamento da peça, as quais são estabelecidas mediante instruções normativas permitindo a fabricação, utilizar ferramentas padronizadas comercialmente com intuito de diminuir custos, não havendo necessidade de se utilizar ferramentas especiais. Tendo por natureza comportamento estatístico, os processos de fabricação conduzem as dimensões da característica fabricada em torno da dimensão média de fabricação (Teorema do Limite Central).

Sendo assim, é conveniente iniciar o processo de determinação da cadeia dimensional convertendo as dimensões de projeto em dimensões médias com tolerâncias bilaterais simétricas. Considerando a medida especificada em projeto, podem-se seguir as etapas relacionadas abaixo para definir a dimensão média, considerando para o projeto D_{-b}^{+a} mm e para a dimensão relativa da cadeia, $D_m \pm t$ mm:

- Soma-se a dimensão nominal à tolerância do limite superior e inferior determinando seus limites;
- Divide-se a somatória dos valores dos limites encontrados por 2 determinando a dimensão média;
- Subtrai-se o valor do limite superior encontrando o valor da dimensão média calculada, determinando o limite médio superior, e,
- Subtrair o valor da dimensão média do valor do limite inferior calculado, como apresentado na Equação (7).

$$D_{-b}^{+a} m \quad (7)$$

Onde D é a dimensão nominal, a é o limite superior especificado, b é o limite inferior especificado. Considerando que ls é o limite superior, li é o limite inferior, D_m , dimensão

média, t_s , a tolerância média superior, t_i , a tolerância média inferior e t , a tolerância bidimensional média, o cálculo dos limites inferior e superior estão apresentado na Equação (8).

$$\begin{aligned} D + a &= l_s \\ D - b &= l_i \end{aligned} \quad (8)$$

O cálculo da dimensão média (D_m) é ilustrado na Equação (9).

$$\frac{l_s + l_i}{2} = D_m \quad (9)$$

Já a Equação (10) mostra o cálculo das tolerâncias bilaterais médias.

$$l_s - D_m = t_s \quad (10)$$

E, sendo $t_s = t_i = t$ então, tem a Equação (11).

$$D_m \pm t \text{ mm} \quad (11)$$

Links eixo-furo

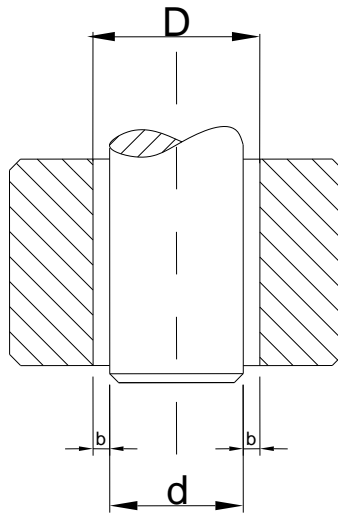
Em análise de cadeia para mecanismos, existem situações onde é necessário calcular a contribuição das tolerâncias nos *links* de vetores dimensão. Uma dessas situações corresponde à formação de *links* eixo- fluxo. Esta necessidade surge do advento de que as distâncias entre centros de furos ou eixos geralmente são cotadas através dos centros dessas características geométricas.

O desenvolvimento dessa etapa carece também da definição do comportamento na cadeia da relação das dimensões e tolerâncias entre o ajuste de furos e eixos, cujo conceito pode ser explorado para descrever a interação de qualquer sistema de montagem de componentes semelhantes.

A composição da transição de um *link* para o vetor dimensão posterior é analisada mediante o deslocamento crítico entre componentes que formam o *link*, o deslocamento originário pela ação de forças no mecanismo e que, inerentemente, são responsáveis pela qualidade da tolerância funcional. Esse é o objetivo da solução da cadeia.

Em suma situação em que o centro do eixo corresponda ao mesmo centro do furo, como ilustrado na Figura 3 e considerando o ajuste sendo folgado tem-se a Equação (12).

Figura 3 – Eixo e furo centrados



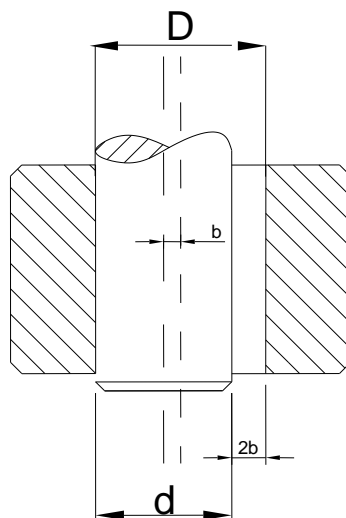
Fonte: Souza, V.A. 2013

$$\begin{aligned} D &= d + 2b \\ b &= \frac{D - d}{2} \end{aligned} \quad (12)$$

Onde b é a dimensão da folga entre o furo e eixo, D é a dimensão nominal do furo e d é a dimensão nominal do eixo.

Imaginando que o eixo se situe sobre o furo, a distância entre centros será determinada pela translação da superfície externa do eixo até o encontro com a superfície interna do furo, como ilustrado na Figura 4.

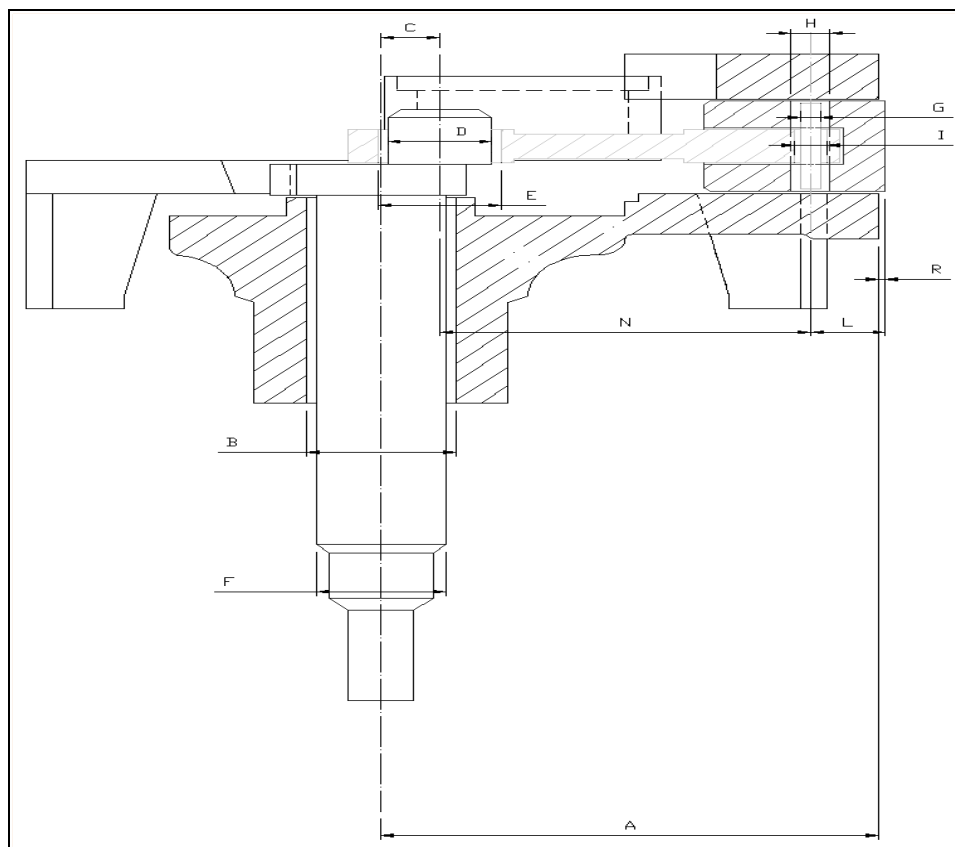
Figura 4 – Eixo deslocado



Fonte: Souza, V.A. 2013

O componente visualizado na Figura 5, corresponde a um conjunto mecânico da parte de um compressor hermético dedicado a refrigeração. As letras identificam os componentes que o compõem.

Figura 5 – Mecanismo



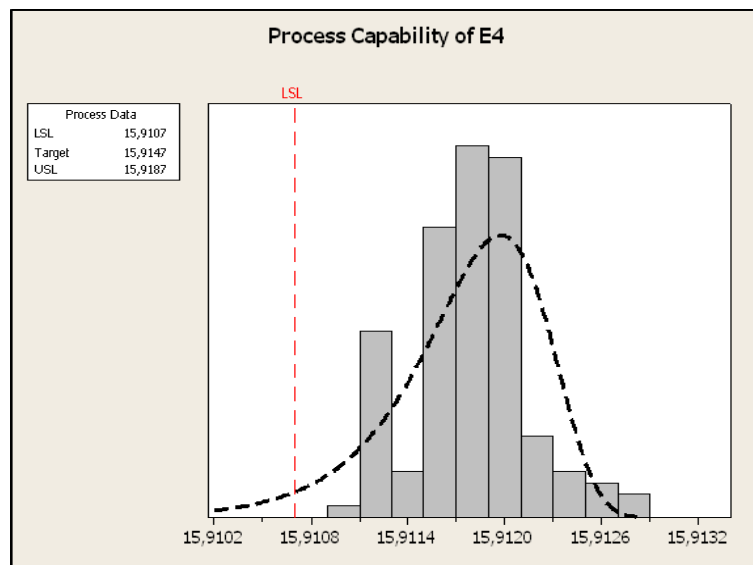
Fonte: Souza, V.A. 2013

O ciclo da cadeia pode ser visualizado na Figura 5 e a equação relativa a dimensão funcional R, seguindo o sentido da figura é dado pela Equação (13):

$$R = -A - b + C - d + E - F - G + H \quad (13)$$

Os gráficos da Figura 6 e Figura 7, representam os valores da medição das variáveis dos elementos da Cadeia e são identificados pela letra que representa o vetor na cadeia.

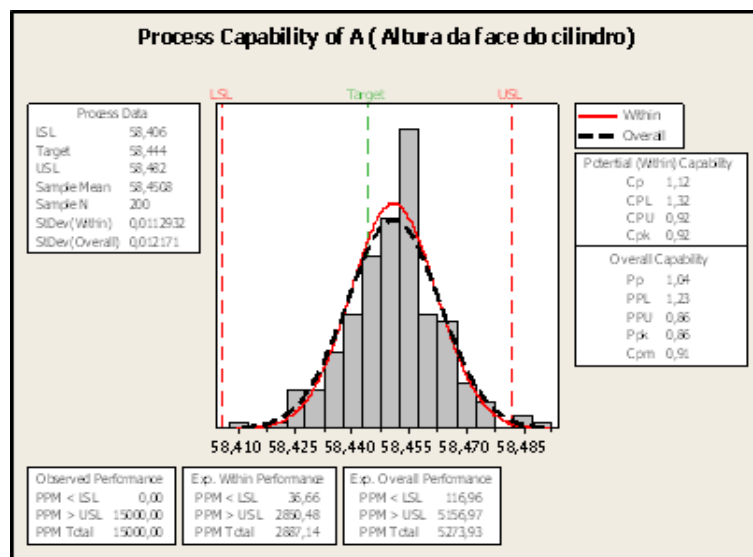
Figura 6 – Vetor E



Fonte: Souza, V.A. 2013

A Figura 6 representa a produção do componente E referente a cadeia, observa-se que a média não está centrada. A Figura 7 designa a fabricação da característica A do elemento da cadeia.

Figura 7 – Vetor A



Fonte: Souza, V.A. 2013

4 Considerações finais

O modelo proposto equacionou a condição funcional e considerou os desvios de média dos processos de fabricação. A partir da aplicação e estudo do método pode-se chegar às seguintes conclusões:

- A somatória das tolerâncias considerando *mean shift* determina que as tolerâncias não são somadas pelo método absoluto.
- O modelo proposto desenvolve uma maneira simples e mais realista quando considerados os desvios de média, uma vez que os processos de fabricação não trabalham com média centrada.
- A relação dos elementos da cadeia deve ser abordada considerando a posição dos elementos que a compõem. Os componentes dos *links* da cadeia devem ser avaliados na posição mais crítica com relação à condição funcional.
- O modelo considerou desvio de média dos processos, porém, uma análise mais criteriosa pode evidenciar que os desvios de média não são tão próximos de $1,5\sigma$. O modelo adotado considerou valor máximo. Valores menores podem ser utilizados, porém carecem de máquinas mais precisas e, portanto, com custo mais elevado.

Referências bibliográficas

ABNT-NBR6158. Sistema de Tolerâncias e Ajustes, ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 1996.

ANSELMETTI, B.; BOURDET, P. Optimization of a workpiece considering production requirements. Computer in Industry, Elsevier Science Publishers B.V., p.23-24, 1993.

BJORKE, O. Computer Aided Tolerancing, Tapir Publisher, 1978.

CHASE, K.W.; PARKINSON, A.R. A Survey of Research in the Application of tolerance Analysis to the Design of Mechanical Assemblies, Research in Design, v. 3, p. 23-27, abr. 1999.

CIURANA, J. [et al.]. Computer Application to Aid the Unidirectional Functional dimensioning and Tolerancing synthesis. Engineering Computations, Department of Mechanical Engineering and Industrial Construction, University of Girona, Spain, V. 21, p. 455-469, 2004.

DIMENSIONING AND TOLERANCING ASME Y 14.5M. ASME, USA ,1994.

FISCHER, B. R. Mechanical Tolerance Stackup and Analysis, 2ª edição, abr. 1994.

LAPERRIÈRE, L. [et al]. Tolerance Analysis and Synthesis Using Jacobian Transforms. CIRP-Annals, v. 49, ed. 1, p. 359-362, 1999.

MONTGOMERY, D. C. Introdução ao Controle Estatístico de Qualidade, 4ª edição, 2004.

SOUZA, V.A. Método de Análise de Cadeia de Propagação de Cadeia de Dimensões, São Carlos, SP, 2013. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Área de Concentração em Projeto Mecânico, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2013

SHEN, Z. [Et al] A Comparative Study of Tolerance Analysis Method, Proceeding of the ASME Design Engineering Technical Conference, Utah, EUA, v. 4, p. 471- 482, out. 2004.

ZOU, Z.; MORSE E. Statistical Tolerance Analysis Using GapSpace, 7th CIRP International Seminar on Computer Aided Tolerancing, France, p. 313-322, abr. 2001.